

鋼構造立体ラーメン骨組の倒壊挙動を把握するための解析モデルに関する研究 (その1 箱型断面柱の Multi-Spring モデルの再検討)

1. はじめに

E ディフェンスで実施された鋼構造実大 4 層骨組震動実験における倒壊挙動を表現するために、高精度に解析できる統合化構造解析システム¹⁾が提案されている。同システムによる解析は、高精度に解析できる代わりに解析自由度が非常に高く、扱いにくいというデメリットがあった。一方、汎用解析ソフトを用い、簡便な立体解析モデルを用いて倒壊挙動を表現する試みもある²⁾。建物全体の倒壊挙動を把握するためには、各部材について耐力劣化を表現できる解析モデルによって建物の地震時の挙動を検証する必要がある。その1では柱について検証する。

局部座屈を伴う箱型断面の荷重-変形関係のモデル化については、加藤³⁾、山田ら⁴⁾の研究に基づいた圧縮時の応力度-歪関係モデルとバウジンガー効果を考慮できる大井らの履歴則⁵⁾を組み合わせた Multi-Spring 要素による解析モデル²⁾と実験値との比較を行う。昨年の検討には改善の余地があった為、今年はそれを修正し柱の復元力特性をより高精度に再現できるよう再検討を試みた。

2. 検討対象

検討する柱は、いずれも外径 B=300 mm、柱の部材長さ 1640 mm の既往実験⁶⁾を対象とする。鋼材の製造方法、幅厚比、軸力比の異なる部材について、解析値と実験値との比較を行う。既往実験では、鋼材の製造方法は溶接組立 (BB)・冷間プレス成形 (BCP)・冷間ロール成形 (BCR) の 3 種類を用いている。幅厚比は B/t=33 (板厚 t=9 mm)、B/t=25 (板厚 t=12 mm)、B/t=19 (板厚 t=16 mm) の 3 種類を用いている。軸力比は、0 と 0.25 の 2 種類を用いている。解析モデルは下側を固定端、上側を自由端とする。荷重方法は単調荷重、繰り返し荷重、片側漸増荷重を用いる。

3. 柱のモデル

Multi-Spring モデルを使って柱の塑性ヒンジ部分をモデル化する。この際、文献 2)と同様にモデル化する基準モデルを以下に示す。文献 3), 4)の応力度-歪関係を採用すると、圧縮側の復元力特性は図 1 に示すように 5 折れ線でモデル化できる。その 5 折れ線のパラメータの求め方を表 1 に示す。第 1 折れ点を降伏点 (σ_y)、第 2 折れ点を最大耐力点 ($S\sigma_y$)、第 3 折れ点を劣化第一勾配と劣化第二勾配の遷移点 ($T\sigma_y$)、第 4 折れ点を劣化第二勾配と劣化第三勾配の遷移点 ($T_2\sigma_y$) の 5 折れ線とする。幅厚比と材料強度が分かればこの 5 折れ線を求めることができる。引張側の復元力特性は、引張強さまでの二次剛性比を BCR は 0.005、BCP・BB は 0.01 とする。三次勾配は、初期剛性に対して 0.001 とする。

履歴則は、図 2 に示すようにバウジンガー効果を考慮した大井らの履歴則とする。変位軸に沿って平行移動する塑性変形量の係数を表すパラメータ ϕ は 0.5 にし、RO 関数で表される履歴部分の丸みを表すパラメータ γ を 5.0 とする。以上の基準モデルは、実験結果との対応において誤差が大きくなっており、2016 年度には単調荷重の実験と比較してその修正モデルが試案されている⁷⁾。本論では、単調荷重だ

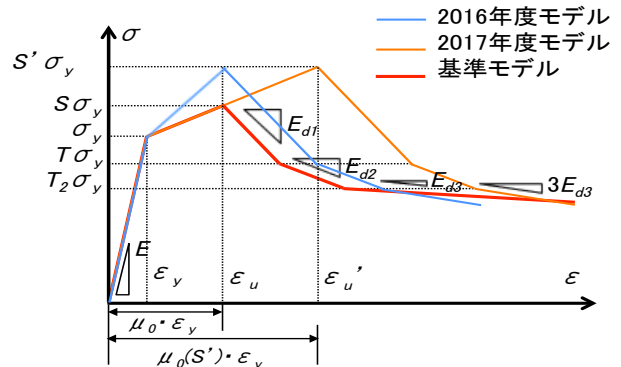


図 1 圧縮側の応力度-歪み度モデル

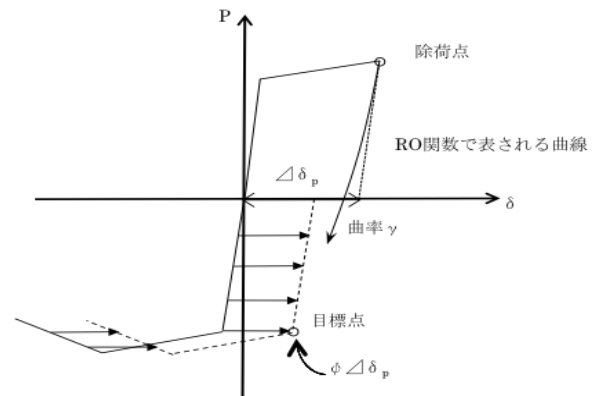


図 2 大井の履歴則

表 1 応力度-歪み度関係の 5 折れ線の骨格曲線に関する諸元

	溶接組立(BB)	プレス成形(BCP)	ロール成形(BCR)
局部座屈長さ領域の長さ $L_s=0.8L_s$	$L_s=B$ ($14.3 \leq B/t \leq 50$)	$L_s=B(16 \leq B/t \leq 50)$	$L_s=B$ ($26 \leq B/t \leq 54.7$) $L_s=0.17+0.032B/t$ ($14.4 \leq B/t \leq 26$)
塑性率 μ_0 と α の関係	$\mu_0=16.0/\alpha-12.7$ ($3.01 \geq 1/\alpha \geq 1.09$)	$\mu_0=17.4/\alpha-9.6$ ($2.51 \geq 1/\alpha \geq 0.72$)	$\mu_0=8.7/\alpha-1.20$ ($2.62 \geq 1/\alpha \geq 0.19$)
劣化第一勾配 Ed1	$E_{d1}/E=-0.014\alpha^2-0.005$ ($3.14 \geq \alpha \geq 0.33$)		
劣化第二勾配 Ed2	$E_{d2}/E=-0.005$ ($3.70 \geq \alpha \geq 0.62$)		
劣化第三勾配 Ed3	$E_{d3}/E=-0.001$		
最大耐力点の 応力上昇率 S	$1/S=0.710+0.167\alpha$	$1/S=0.778+0.13\alpha$	
T/S	$T/S=-0.079\alpha+0.81(3.70 \geq \alpha \geq 0.62)$		
T2/T	$T2/T=0.9$		

α : 基準化幅厚比 $\alpha = \epsilon_y (B/t)^2$

けでなく、繰り返し载荷の実験結果と比較し、表 2 に示すように各パラメータを調整し検討する。調整にあたっては、異なる幅厚比、軸力比に対しても同じ係数を乗じることとする。

4. 実験結果と解析結果の比較

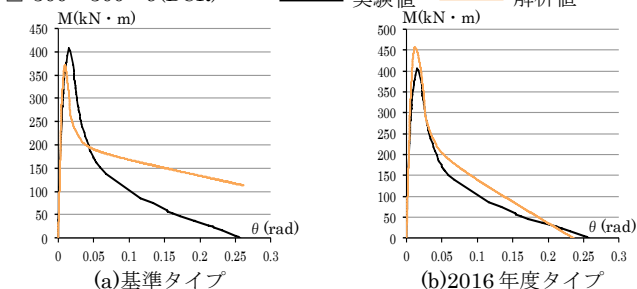
はじめに、単調载荷について記述する。表 2 の組み合わせのうち、基準タイプ、文献 7) で提案されたモデル、2017 年度の改善タイプの 3 つについて比較する(図 3)。基準タイプを見ると実験値と大きな差がある為、2016 年度卒論で定めた、応力上昇率 S' を $1.3 \times S$ 、劣化第三勾配 E_{d3}' を $3 \times E_{d3}$ することで実験値に近づけることを試みた。しかし、2016 年度タイプには最大耐力時の変形が小さくなる傾向があったため、図 1 に示すように 2 次剛性を一定として塑性率 μ_0 を設定した。この 2017 年度タイプでは、応力上昇率 S' を $1.3 \times S$ にすると最大耐力が高くなりすぎる傾向にあった。そこで、応力上昇率 S 、劣化第三勾配 E_{d3} 、塑性率 μ_0 の 3 つパラメータを変化させ、再検討を試みた。最も実験値と対応が良い組合せを 2017 年度タイプとして表 2 に下線を付している。

表 2 解析タイプの概要

	応力上昇率 S'	劣化第三勾配 E_{d3}'	塑性率 μ_0'
基準タイプ	$1.0 \times S$	$1.0 \times E_{d3}$	μ_0
2016 年度タイプ	$1.3 \times S$	$3.0 \times E_{d3}$	μ_0
応力上昇率タイプ	1.1, $1.2 \times S$ (BCR) 1.1, 1.2, $1.3 \times S$ (BCP・BB)	$1.0 \times E_{d3}$	μ_0
応力上昇率・塑性率調整タイプ	$1.1 \times S$ (BCR) $1.2 \times S$ (BCP・BB)	$1.0 \times E_{d3}$	$\mu_0(S')$
応力上昇率・塑性率・劣化勾配調整タイプ	<u>$1.1 \times S$ (BCR)</u> <u>$1.2 \times S$ (BCP・BB)</u>	<u>$3.0 \times E_{d3}$</u>	<u>$\mu_0(S')$</u>

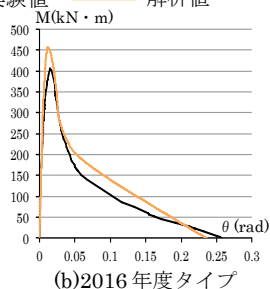
	塑性変形量倍率 ϕ	履歴曲線の丸み γ
ϕ 調整タイプ	$\phi = 0.3, 0.5, 0.8$	$\gamma = 0.5$
γ 調整タイプ	$\phi = 0.5$	$\gamma = 3, 5, 10$

□-300×300×9(BCR)

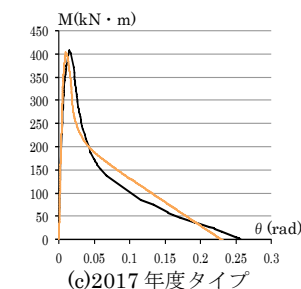


(a) 基準タイプ

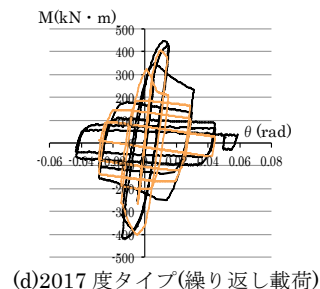
— 実験値 — 解析値



(b) 2016 年度タイプ

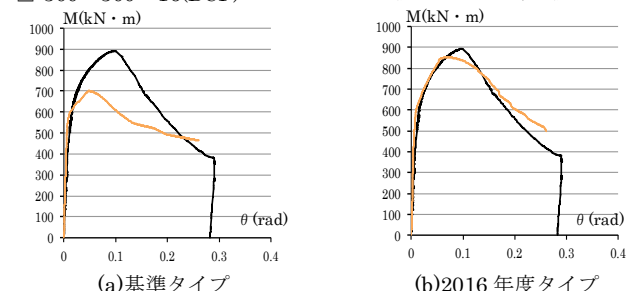


(c) 2017 年度タイプ



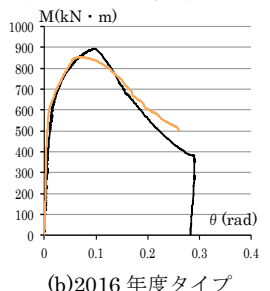
(d) 2017 年度タイプ(繰り返し载荷)

□-300×300×16(BCP)

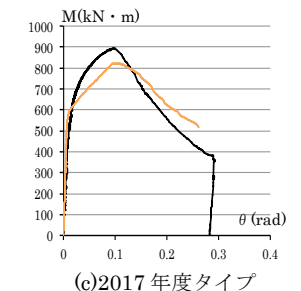


(a) 基準タイプ

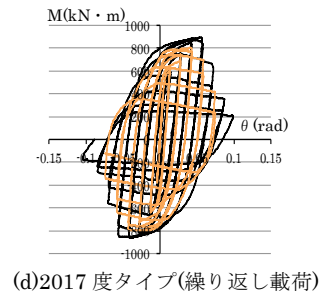
— 実験値 — 解析値



(b) 2016 年度タイプ



(c) 2017 年度タイプ



(d) 2017 年度タイプ(繰り返し载荷)

図 3 実験値と解析値の比較

(向出研究室)

次に、繰り返し载荷について記述する。2016 年度の解析では繰り返し载荷の検討は行なわず、大井の履歴則(図 2 参照)によって定められる ϕ 、 γ を $\phi=0.5$ 、 $\gamma=5$ という一定の値を用いて解析を行った。そこで、2017 年度の解析では、2016 年度の値を基準値とした上で、 $\phi \cdot \gamma$ を変化させ解析値と実験値の検討を行ったところ、 $\phi=0.5$ 、 $\gamma=5$ が最も対応が良いことがわかった。

5. まとめ

既往の研究に基づいて角形鋼管柱を Multi-spring モデルで表現した解析結果と大変形域载荷実験の結果を比較・検証したところ、BCR は応力上昇率 S を 1.1 倍、劣化第三勾配 E_{d3} を 3 倍、BCP・BB は応力上昇率 S を 1.2 倍、劣化第三勾配 E_{d3} を 3 倍にすることで実験値に近づけることができた。また、繰り返し载荷・片側漸増载荷において、大井の履歴則で用いられる $\phi \cdot \gamma$ は、 $\phi=0.5$ 、 $\gamma=5$ が一番良い対応を示した。

[参考文献]

- 1) 森前直樹, 向出静司, 多田元英: 様々な地震動に対する鋼構造立体ラーメンの倒壊性状比較, 日本建築学会講演梗概集, pp.1027-1028, 2014.9
- 2) 片岡大, 田中俊輔など: 部材の耐力劣化を考慮した鋼構造骨組の地震応答解析(その 1~その 2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-1 分冊, pp.1031-1034, 2014.9
- 3) 加藤勉: 閉断面部材の局部座屈と変形能力, 日本建築学会構造系論文集, 第 387 号, pp.27-36, 1987.8
- 4) 山田哲, 石田孝徳, 島田侑子: 局部座屈を伴う角形鋼管柱の劣化域における履歴モデル, 日本建築学会構造系論文集, 第 674 号, pp.627-636, 2012.4
- 5) 孟令樺, 大井謙一, 高梨晃一: 鉄骨骨組地震応答解析のための耐力劣化を伴う簡易部材モデル, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 437 号, pp.115-124, 1992.7
- 6) 向出静司, 奥伸之, 松尾克也, 多田元英: 製造方法が異なる箱形断面柱の大変形域载荷実験, 鋼構造論文集, 第 23 巻, 第 90 号, pp.51-64, 2016.6
- 7) 橋本隼, 倉中拓也: 鋼構造立体ラーメン骨組の倒壊挙動を把握するための解析モデルに関する研究, 大阪工業大学工学部建築学科卒業論文, 2017.2